

## 도심지 깊은굴착시 주변 건물 및 매설관 손상평가

### Deep Excavation-induced Building and Utility Damage Assessment

유충식<sup>1)</sup>, Chungsik Yoo

<sup>1)</sup> 성균관대학교 토목환경공학과 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg. Sungkyunkwan University

**개요(SYNOPSIS) :** A substantial portion of the cost of deep excavations in urban environments is devoted to prevent ground movements and their effects on adjacent buildings and utilities. Prediction of ground movements and assessment of the risk of damage to adjacent structures has become an essential part of the planning, design, and construction of a deep excavation project in the urban environments. This paper presents damage assessment techniques for buildings and utilities adjacent deep excavation, which can be readily used in practice.

**Key words :** deep excavation, building damage, utility damage, angular distortion, lateral strain

## 1. 서론

도심지에서의 인구증가는 고층건물 및 지하철 등 각종 사회 기반시설 건설로 이어지며 앞으로는 사용 가능한 지상 공간이 부족해짐에 따라 지하공간 개발이 더욱 가속화될 전망이다. 이에 반해 지하공간 건설공사에 있어서 주변 환경적 여건은 국민의 환경의식 강화 및 협소한 국토 공간 등으로 인해 과거 보다 현저히 악화된 실정이다. 특히 도심지에서의 지하공간 건설공사에서는 지하굴착 혹은 터널 공사 시 해당 구조물 자체를 안전하게 시공하여야 함은 물론 주변구조물에 대한 영향을 최소화하여야 한다는 전제조건이 전반적인 공사계획 및 설계에 지대한 영향을 미치는 중요한 사항으로서 대두되고 있다.

국내에서도 지반굴착공사의 계획 및 설계 단계에서 지반거동을 예측하고 이를 토대로 주변 구조물에 대한 영향을 평가하는 과정을 거치고는 있으나 많은 경우에 있어서 부적절한 검토가 이루어지고 있다. 특히, 지반굴착시 발생하는 지반변위 특성에 대한 고려 없이 건물자중에 의한 침하로 발생하는 각변위를 토대로 손상도를 평가하는 방법을 적용하고 있으나 이러한 접근방법은 경우에 따라서는 부적절한 결과를 초래할 수 있다고 지적된 바 있다(유충식 등 2000). 한편, 인접 매설관에 대한 평가는 지반굴착과 매설관의 상호작용에 대한 고려 없이 획일적이고 형식적인 검토가 이루어지고 있어 굴착시 매설관의 손상평가가 매우 부실하게 이루어지고 있다고 하겠다.

이러한 맥락에서 본 논문에서는 현재 우리나라에서 이루어지고 있는 지반굴착시 주변 건물 및 매설관 영향평가에 있어서의 문제점을 고찰하고 현재 선진국에서 개발·적용하고 있는 각종 기법을 소개하여 실무에서 손쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

## 2. 지반굴착시 지반거동 특성

굴착으로 인해 발생하는 지반거동에 의한 주변 구조물의 손상 특성은 지반변위로 인해 발생하는 지반의 수평변형률 및 전단변형률과 같은 직접적인 변형률과 뒤틀림 및 휨변형률과 같은 추가적인 변형률에

의해 특징지어지게 된다. 이러한 변형률은 다시 지반거동 특성, 즉 지표 및 지중변위 양상에 좌우 되므로 구조물 손상평가를 위해서는 굴착이 진행되면서 발생하는 지반거동 특성에 대한 이해가 필요하다.

그림 1에서 나타난 바와 같이 지반굴착은 벽체의 변형을 유발시키고 벽체변위는 다시 주변 지반변위 그리고 더 나아가서 지표침하로 이어지게 되며 이러한 지반변위는 지중매설관 및 건물 등 인접 구조물에 뒤뜰림, 인장, 휨변형을 부과한다. 따라서 깊은굴착으로 유발되는 주변 지반의 거동 양상은 결국 굴착이 진행되면서 발생하는 흠막이 벽체의 변위 특성과 매우 밀접한 관계가 있다고 하겠다.

단계별 굴착이 이루어지는 굴착공사의 특성상, 각 단계에서의 시공과정은 최종단계에서의 벽체 및 지표침하 양상에 많은 영향을 미친다. 예를 들어 그림 2(a)에서 나타난 바와 같이, 스트러트 혹은 앵커 등 지보재가 설치되기 이전의 초기 단계에서의 벽체 변위는 캔틸레버 형태로 나타나며 이때 발생하는 지표침하의 형태는 포물선 형태를 따르게 된다. 한편, 그림 2(b)와 같이 지지구조가 설치된 후에 수행되는 굴착에서는 지보재와 굴착저면이 벽체변형에 대한 저항력을 제공하게 되므로 굴착저면과 최하단 지보재 사이에서 발생하는 측방변위가 벽체 변위의 주된 제공인자가 되며 이로 인한 지표침하는 아래가 볼록한 유형을 따르게 된다. 따라서, 임의 굴착현장에서 최종단계에서의 벽체변위 및 지표침하 양상은 위에서 언급한 캔틸레버 변위 및 측방 배부름으로 특징지어지는 벽체변위의 각 성분을 토대로 결정할 수 있다. 이와 같이 벽체변위 및 침하 유형은 벽체강성 및 시공과정에 따라서 좌우되며 이로 인해 발생하는 주변 구조물 손상특성은 결국 지반거동 양상(지표침하 및 지중변위)과 밀접한 관계가 있으므로 설계 단계에서 이에 대한 정확한 평가가 필수적이라 하겠다.

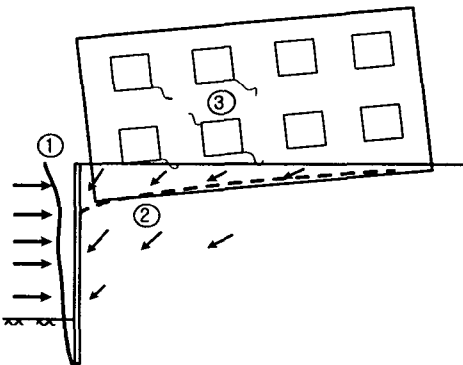


그림 1. 지반굴착 및 구조물 손상



그림 2. 벽체 및 지반침하

위에서 언급한 지반 거동 특성은 굴착단면상에서의 거동 특성이며 주변 건물에 대한 손상평가지 적용이 가능하다. 매설관에 대한 손상평가에 있어서는 위에서 고려된 단면보다는 굴착현장 평면상에서의 거동을 고려하여야 한다. 즉 아래 그림 3과 같이 지반굴착시 매설관 손상에 영향을 미치는 주요 변형형태(deformation mode)는 평면상에서의 S-자 형태의 변형으로

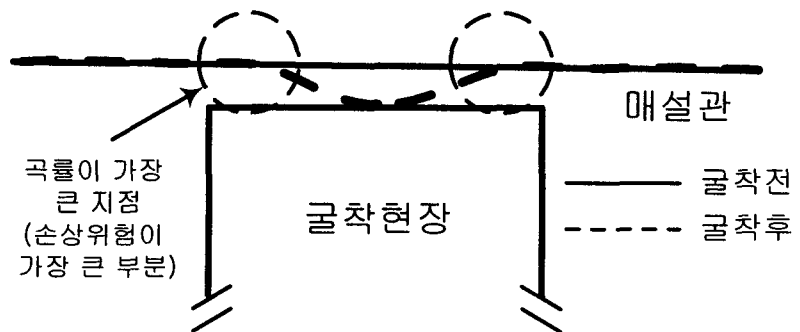


그림 3. 매설관의 주요 손상모드

로서 곡률이 가장 큰 부분에서의 휨변형, 조인트 인발 및 회전 등의 손상이 발생하게 된다. 따라서, 매설관의 손상평가지에는 지반굴착에 따른 매설관의 변형 메커니즘을 토대로 적절한 지반변형 모드를 고려하여 주 손상 항목에 대한 평가가 필요하다고 하겠다.

### 3. 건물손상평가

#### 3.1 건물의 각변위 및 수평변형률을 고려한 건물 손상평가

깊은굴착시 지반에 발생하는 연직 및 수평변위는 주변구조물에 각변위(angular distortion)와 수평변형률(lateral strain)을 유발시키며 따라서 이러한 변형률의 크기에 따라 구조물의 손상여부가 좌우된다. 그림 4는 지반거동에 따른 주변구조물 손상평가에 있어서 적용되고 있는 각변위와 수평변형률의 정의를 설명하고 있다. 구조물의 손상정도는 각변위와 수평변형률이 복합적으로 작용할 경우가 각변위만이 작용할 경우와 비교하여 현저히 증가하는 것으로 보고 되고 있어 수평변형률 또한 매우 중요하게 다루어져야 한다. 이러한 맥락에서 국내에서와 같이 굴착문제에 있어서 건물의 자중에 의한 침하에 대한 기준을 적용할 경우 부적절한 결과를 초래할 수 있다.

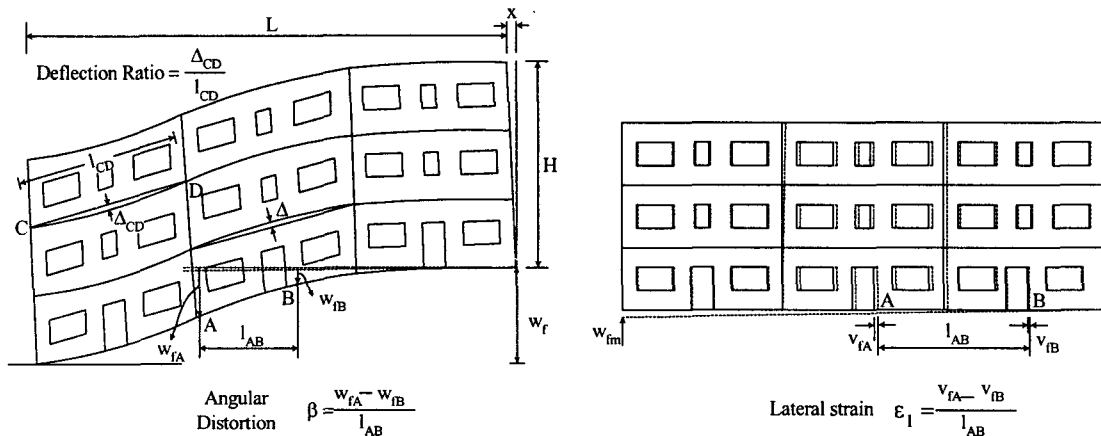


그림 4. 각변위와 수평변형률의 정의

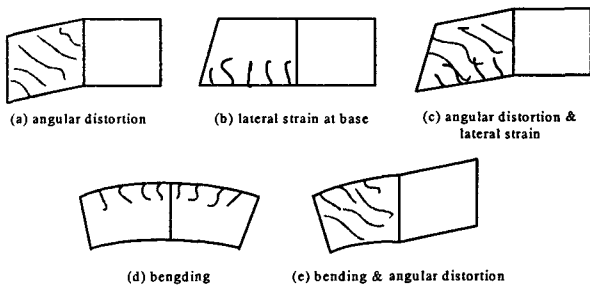


그림 5. 건물손상유형 (after Cording et al. 2001)

그림 5는 Cording et al. (2001)이 제시한 건물 벽체에 작용하는 변형률에 따른 건물 손상 유형을 보여주고 있다. 그림 5(a)~5(e)에서 보이는 바와 같이 벽체에는 각변위와 수평변형률의 복합적인 작용으로 인해 손상이 발생한다. 즉 지반의 수평변위에 의해 발생하는 수평변형률( $\epsilon_{LF}$ )은 초기단계에는 벽체하부에 국한하여 균열을 발생시키나 벽체 상단부에 휨 균열과 전단균열이 발생하면서 벽체 상부에까지 전파되어 균열폭을 확장시키게 된다. 이와 같이 지반굴착으로 인한 지반변위는 연직 및 수평 성분을

포함하며, 따라서 주변 구조물에는 이로 인한 각변위와 수평변형률이 부과되므로 두 성분의 고려 없이는 효율적인 손상평가를 기대하기 어렵다고 할 수 있다.

한편, 건물 벽체에 발생하는 균열 유형은 벽체의 길이(L)와 높이(H)의 비(L/H)와 밀접한 관계가 있는데 L/H가 큰 경우에는 각변위의 정도가 낮더라도 큰 크기의 휨변형률이 벽체 상단부에 발생하여 균열을 유발시키나 L/H가 작은 경우에 있어서는 벽체가 깊은보로 거동하게 되고 따라서 벽체 상단부에 전단균열이 발생한 후에 큰 크기의 휨변형률이 발생하게 된다. 이와 같이 지반거동에 따른 주변 건물의 손상정도와 유형은 지반변위의 크기 및 특성, 벽체의 기하적 특성, 건물의 구조적 특성 등에 좌우되며 따라서 평가시에는 이에 대한 고려가 필요하다고 하겠다.

지반굴착에 따른 주변구조물의 손상평가 기법은 그동안 국외에서의 많은 연구를 통해 그 방법적 측면에서 어느 정도 일반화 되었다고 할 수 있다. 이에 관련된 연구는 대개 미국 및 영국, 그리고 캐나다의 연구자들에 의해 수행되었으며 터널굴착을 대상으로 기법이 개발된 후 깊은굴착 문제로 확장하여 적용

하기에 이르렀다.

대표적인 방법으로는 Boscardin & Cording (1989)이 제시한 손상평가 기법을 들 수 있는데 이들이 제시한 기법은 앞서 언급한 각변위와 수평변형률을 고려한 것으로서 이후에 Burland (1995)는 Boscardin & Cording의 연구 결과를 확장하여 처짐비(deflection ratio)와 수평변형률에 근거한 기준을 제시하였다. Boscardin & Cording의 기준은 손상평가 대상 건물의 지주벽(bearing wall) 혹은 외벽(facade wall)에 발생하는 수평 및 전단변형률의 합을 토대로 계산되는 최대 인장변형률을 균열정도를 구분하는 임계 인장변형률(critical strain)과 비교하여 손상정도를 평가하는 방법을 취하고 있다(표 1).

Boscardin & Cording (1989) 그리고 Cording et al. (2001)은 지반거동으로 인한 건물손상평가시 건물 벽체에 유발되는 변형률을 평가하는 방법으로서 평균변형률 개념을 제시하였다. 여기서 평균변형률은 지반거동으로 인해 영향을 받는 건물의 벽체를 하나의 요소 혹은 개체로 간주하여 계산되는 평균적인 변형률로서 앞서 언급한 수평변형률과 각변위를 토대로 계산할 수 있다. 여기서 중요한 점은 굴착이 진행됨에 따라 지반변위는 파동(traveling wave)의 형태로 주변 구조물로 전파되기 때문에 굴착이 진행됨에 따라 대상 벽체에 발생하는 평균변형률 평가 시에는 이점을 감안하여야 한다는 점이다. 임의의 요소에 수평변형률과 각변위가 작용할 경우 최대 주 인장 변형률( $\epsilon_p$ )은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_p = \beta \sin \theta \cos \theta + \epsilon_L \cos^2 \theta; \quad \tan(2\theta) = \beta / \epsilon_L \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는  $\epsilon_p$ 가 작용하는 평면이 수직면과 이루는 각도를 나타낸다.

그림 5는  $\epsilon_L$ 과  $\beta$  그리고 손상도의 관계를 나타내고 있는데 이 그림은 기존의 Boscardin & Cording (1989)이 제시한 도표에 평균변형률개념을 적용하여 다소 수정한 것으로서 각 손상도의 경계는 임계변형률에 해당하는 일정한  $\epsilon_p$ 의 값을 가진다. 각변위  $\beta$ 만이 작용할 경우 최대 주 인장 변형률은  $\epsilon_p = 1/2\beta$ 의 값을 가지며  $\theta=45^\circ$ 의 평면에 작용하므로 균열의 방향은 작용방향과  $90^\circ$ 를 이루는  $\theta=-45^\circ$ 가 된다. 반면에 수평변형률  $\epsilon_L$ 만 작용할 경우에는  $\epsilon_p = \epsilon_L$ ,  $\theta = 0^\circ$ 이며 따라서 균열은 연직방향으로 발생하게 된다. 기존의 Boscardin & Cording (1989)의 도표는  $L/H=1$ 인 깊은보에 발생하는 변형률을 토대로 작성되었다는 점에서 그림 6에 제시된 결과와는 근본적으

표 1. 손상등급 (after Boscardin & Cording, 1989)

손상 수준	손상도	임계인장변형률 $\epsilon_{lim}$ (%)	손상유형
0	무시	0~0.05	• 0.1 mm 이하의 헤어 크랙
1	매우 경미	0.05~0.075	• 표면마감으로 쉽게 처리되는 미세균열 • 내벽에 주로 발생 • 조적식 구조물의 경우 외벽에도 발생 • 최대 균열폭은 1 mm
2	경미	0.075~0.15	• 균열을 쉽게 찾아낼 수 있으며 재마감이 필요하고 풍화방지를 위해 조치가 필요 • 문짝과 창문을 여는데 어려움이 있음 • 최대 균열폭 5 mm
3	우려	0.15~0.3	• 균열보수를 위해 표면을 갈아내고 처리 필요 • 조적식 구조물의 경우 일부를 재시공하는 경우가 발생 • 주변 매설물에 손상이 발생하고 문짝과 창문이 잘 닫기지 않음 • 최대 균열폭 5~15 mm 혹은 3 mm 이상의 균열이 다수 발생
4~5	심함 내지 매우 심함	> 0.3	• 벽체, 문짝 및 창문이 뒤틀려 재시공 필요. 최대 균열폭 15~25 mm • 매우 심각한 경우에는 빌딩의 재시공이 필요함: 최대 균열폭 > 25 mm

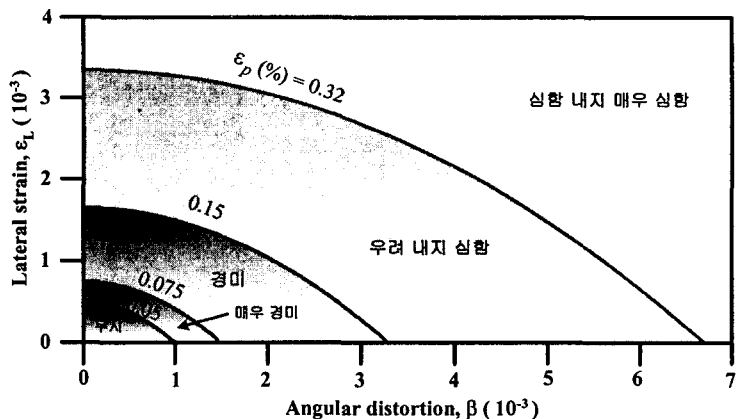


그림 6.  $\epsilon_L$ - $\beta$ 관계와 손상정도

본적으

로 차이가 있다고 하겠다.

지반굴착시 발생하는 지반거동으로 인해 건물벽체에 발생하는 변형률은 그림 7에서 보이는 바와 같이 검토대상 벽체를 건물의 구조적 특성을 감안하여 구획(bay)으로 구분하고 각 구획에 대한 기하조건과 지반변위를 토대로 계산할 수 있다. 즉, 그림 7에서와 같이 벽체를 두개의 요소로 구분하고 각 요소의 수평 및 연직 변위 그리고 기하조건을 토대로 각변위와 수평변형률을 계산할 수 있다. 구획 1에 대한 각변위와 수평변형률은 그림 7에 나타난 바와 같이 계산된다.

벽체 내에 유발되는 변형률 상태는 비균질 하다는 점과 일단 균열이 발생한 후에는 벽체가 연속체적인 특성을 상실한다는 점을 감안할 때 위에서 제시한 변형률 계산방법은 다소의 오차가 있을 수 있으나 예비평가의 기준으로 적용하는 데는 큰 무리가 없이 적용할 수 있다.

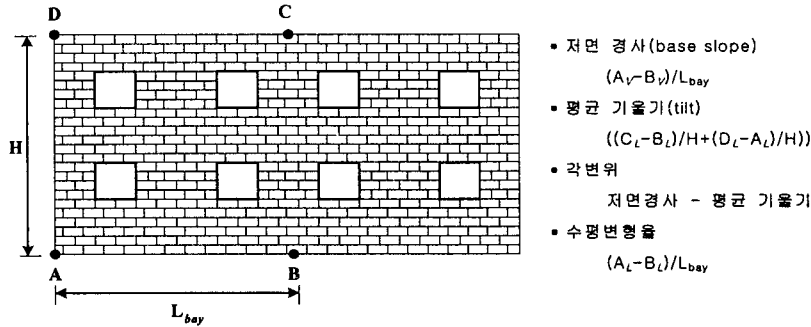


그림 7. 평균변형률 계산

한편, 건물에 대한 손상평가에 있어서는 2단계 평가가 필요하다. 즉 1차적인 근사적 평가의 개념에서 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않고 건물은 지반과 일체를 이루어 거동한다는 가정을 토대로 건물과 지반의 상호작용이 고려되지 않은 지반변형곡선을 이용하여 평가한다. 1차 평가에 있어서 '손상가능'으로 평가될 경우에는 지반-구조물 상호작용 개념이 적용된 2차 평가를 수행하여 손상여부를 최종적으로 평가한다. 본 절에서는 1차평가에 적용되는 근사법을 제시하였다.

### 3.2 지표침하 및 수평변위 평가

앞절에서 제시된 각변위와 수평변형률이 고려된 건물손상평가를 위해서는 먼저 대상현장에서의 지반 침하곡선을 추정하고 이를 토대로 각변위와 수평변형률을 계산하여 적용하여야 한다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 지표변위곡선은 손상평가에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다고 하겠다. 지반변위 곡선은 지보시스템의 강성, 첫 번째 지보재의 설치시기, 무지보 구간의 거리 등에 의해 많은 영향을 받으므로 정확한 추정을 위해서는 이들을 고려하여야 하나 실무적 측면에서는 식 (2)와 같은 포물선 함수를 가정하여 적용할 수 있으며 여기서 최대 침하  $d_{v,max}$ 는  $d_{h,max}$ 의 70%정도를 취할 수 있다 (Cording 2001)

$$\delta_v = \delta_{v,max} \left(1 - \frac{x}{2H}\right)^2 \quad (2)$$

한편, 그림 8은 다양한 굴착조건에 대한 유한요소해석 결과로부터 얻어진 지표변위곡선을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 지표수평변위 곡선은 지표침하곡선과 비교하여 전반적인 양상 및 변위의 크기에 있어서 거의 유사한 것으로 나타나고 있다. 따라서 수평변형률을 결정하는데 요구되는 지표수평변위 곡선은 대략적으로 지표침하곡선과 유사하게 간주하여도 무방하다.

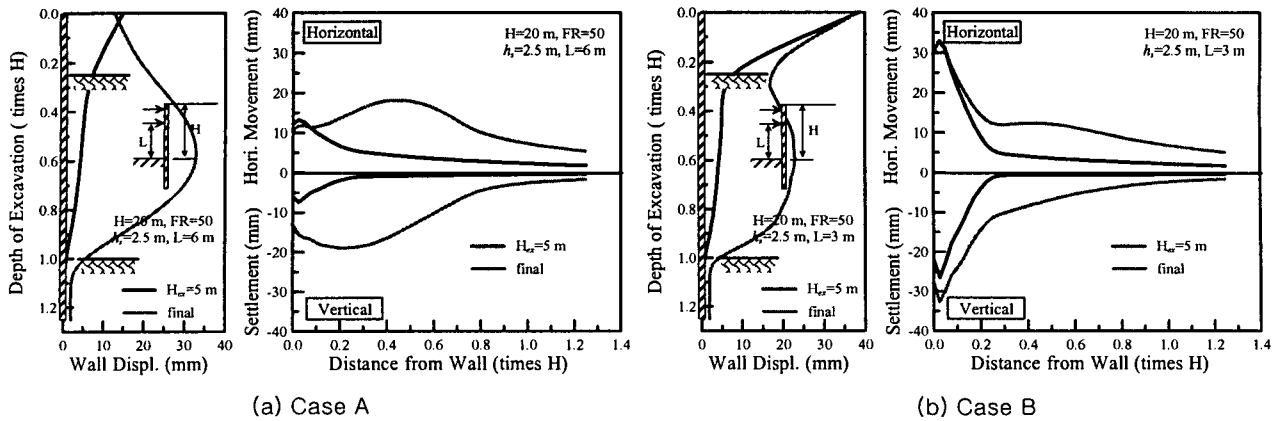


그림 8. 벽체 변위 및 지표변위 곡선 (유한요소해석)

### 3.3 적용예

본 절에서는 그림 9에서와 같이 높이(H) 12 m 길이(L) 16 m의 제원을 갖는 가상의 3층 조적식 구조물이 실제 현장계측을 통해 지표침하가 측정된 두 현장에 인접하여 위치하는 경우를 고려하였다. 일반적으로 현장계측시 지중 수평변위는 측정하지 않으므로 손상평가에 필요한 수평변위는 각종 자료를 토대로 추정하여 적용하였다. 한편, 평가에서는 건물자중에 의한 침하 발생시 적용하는 기준과 언급한 Cording et al. (2001)의 방법을 적용하여 비교하였다.

그림 10은 현장 A와 B의 침하 및 수평변위 곡선에 건물을 덧씌운 그림을 보여 주고 있으며 표 2는 침하 및 수평변위 곡선으로부터 계산한 건물의 최대 가능 각변위와 수평변형을 그리고 이를 토대로 한 손상도 평가 결과를 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 건물에 발생할 수 있는 각변위 및 수평변형률에 근거한 Cording et al.의 평가기준이 각변위만을 이용하여 경우 보다 월등히 높은 손상도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 결국 수평변형률의 고려 여부가 손상도 평가 결과에 많은 영향을 미칠 수 있음을 단적으로 보여주는 것으로서 이에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다. 한편, Cording et al.의 기법 또한 평균변형률에 근거한 근사적 방법으로서 보수적인 면이 내포되어 있으므로 손상평가 결과 우려할 만 한 등급으로 판정된 건물에 대해서는 건물/지반 강성비, 건물의 기하조건, 건물의 구조특성 등을 고려하여 보다 상세한 검토를 추가적으로 수행하는 것이 바람직하다.

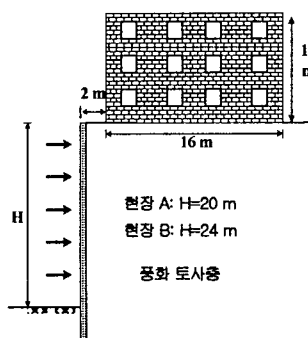


그림 9. 검토대상 건물 개요도

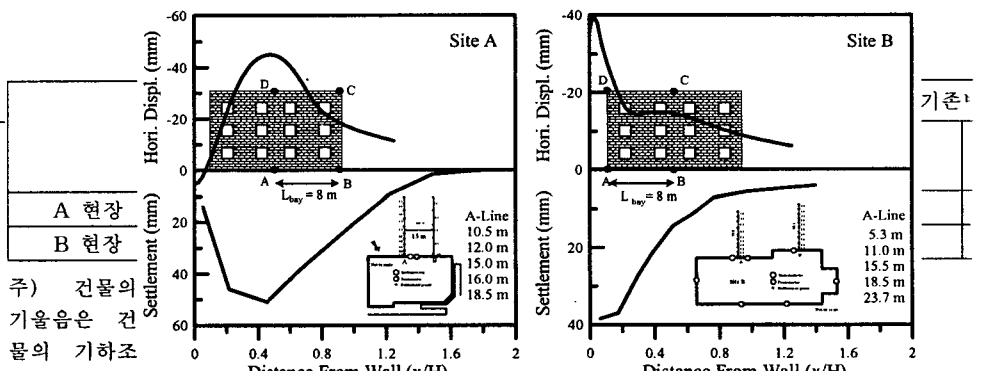


그림 10. 지표침하 및 수평변위 곡선

사의 약 50%로 가정

## 4. 매설관 손상평가

### 4.1 매설관 손상평가 기준

일반적으로 매설관의 손상여부는 터널굴착 이전의 매설관의 상태, 즉, 매설관의 부식정도, 응력수준, 조인트 형식 및 시공상태에 따라 달라지며, 매설관의 시공완료 후 시간이 경과하면서 부식정도 및 외부영향 등이 누적됨에 따라 응력수준 또한 증가하므로 이를 고려하여 손상한계를 설정하여야 한다.

일반적으로 매설관의 허용변형률을 설정할 경우에는 매설관의 재료와 부식정도, 그리고 응력수준 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 즉, 매설관의 재질은 연주철(ductile iron)과 같은 연성주철과 회주철(low-grade grey iron)과 같은 취성주철로 구분되며, 취성주철의 경우 응력집중으로 인한 취성과파괴가 발생할 가능성이 높으므로 연성주철 보다 낮은 허용 변형률을 적용하여야 한다. 표 3과 4는 각각 Attewell 등(1986)과 Bracegirdle 등(1996)이 제안한 조인트 회전각 및 관체 변형률 증가량에 대한 허용치를 나타내고 있다.

표 3. 매설관 허용 증가 회전각 및 인발변위

조인트 방식 및 상태	회전각 (degree)
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 有)	0
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 無)	1.0
Lead-yarn 조인트의 상수도관	1.5
고무 개스킷 조인트의 가스관 혹은 상수도관	2.0

표 4. 매설관의 재질에 따른 설계변형률 및 허용 변형률 증가

매설관 재질	허용 변형률 증가 ( $\mu\epsilon$ )	
	인장	압축
Pit 회주철 (pit cast grey iron)	100	1200
Spun 회주철 (spun cast grey iron)		
연주철(ductile iron)	500	700

(After Attewell 등, 1986; Bracegirdle 등, 1996)

### 4.2 지반변형곡선

매설관의 손상은 지반변형곡선의 특성에 따라 좌우되므로 매설관 손상평가에서는 건물손상평가와 마찬가지로 지반변형곡선이 매우 중요한 부분을 차지한다. 즉, 지반변형으로 인해 매설관에 발생하는 휨 및 인발변형은 지반변형곡선을 수학적으로 표현할 경우 각각 2계 및 1계 도함수와 같으므로 지반변형곡선을 수학적 함수로 표현할 경우 이에 대한 평가가 매우 수월해진다. 따라서 많은 연구자들이 매설관 손상평가에 적합한 지반변형 곡선으로서 Sine 함수, Hyperbolic(쌍곡선) 함수, Spliced Exponential 함수, 오차(Error) 함수 등을 제시한 바 있으며 오차함수가 수학적으로 처리가 간편하여 적용성이 높다고 할 수 있다. 즉 식 (3)으로 정의되는 오차함수는 터널굴착시 발생하는 지표침하곡선으로 널리 적용되고 있다.

$$\delta = \delta_{\max} \exp(-ax^2) \quad (3)$$

여기서  $a$  는 오차함수의 폭(L) 혹은 변곡점의 위치로 표현할 수 있는 특성 파라메타이며,  $d$ 와  $d_{\max}$ 는 각각 임의지점에서의 변위 및 최대변위이다. 그림 11은 오차함수를 도식적으로 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 식 (3)으로 정의되는 지반변형곡선의 특성상 변곡점은  $x = \pm 1/\sqrt{2a}$  ( $\delta = 0.61 \delta_{\max}$ )에서 발

생하며 곡선의 폭은 최대변위의 5%가 발생하는 지점 즉  $\delta = 0.095\delta_{\max}$ 까지로 간주한다. 따라서 위의 경계조건을 적용할 경우  $a$ 와  $L$ 의 관계는  $a = \frac{\ln(20)}{L^2}$ 로 표현된다. 오차함수는 수학적 정의가 분명하고 미분이 용이하므로 지반변형곡선을 2회 미분하여 계산되는 '곡률(curvature)'의 평가가 편리하다는 이점이 있다.

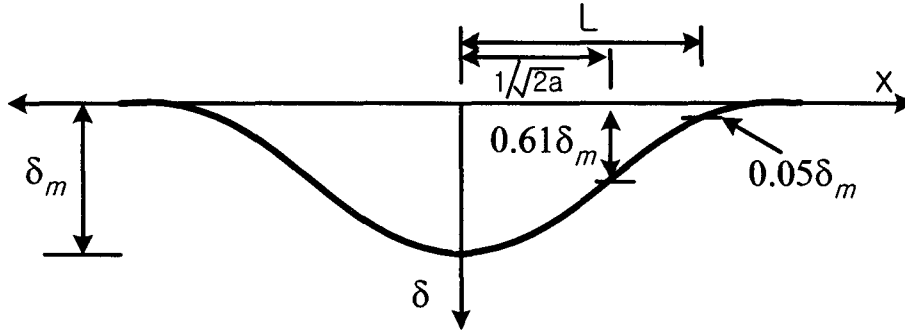


그림 11. 오차함수 특성

### 4.3 매설관 회전각 및 휨변형률

매설관의 휨 변형률과 조인트의 회전각은 다음과 같은 개념에 의해 계산된다.

#### 1) 조인트 회전각

조인트 회전각의 평가에 있어서는 가장 불리한 조건을 고려하여 아래 그림 12와 같은 조건에서 최대 지반경사를 조인트의 회전각으로 간주할 수 있다. 따라서, 최대 지반경사는 오차함수의 특성을 이용하여 식 (4)과 같이 표현된다.

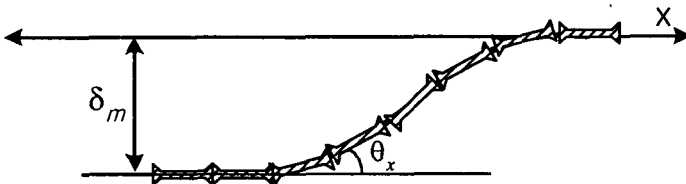


그림 12. 조인트 회전각 개념도

$$\theta_x = \tan^{-1}\left(\frac{\delta_{\max}}{L}\right) \quad (4)$$

#### 2) 관체 휨변형률

지반변형으로 인해 발생하는 관체 휨변형률은 지반변형곡선의 곡률과 비례하므로 식 (3)의 오차함수의 2계 도함수로부터 결정할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 오차함수의 특성상 최대곡률은  $x = \pm 3/2a$  지점에서 발생하며 따라서 직경  $d$ 의 매설관에서의 최대 휨변형률은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\epsilon_{bx} = \frac{d}{2} \left( \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \right)_{\max} = 0.45 a d \delta_{\max} \quad (5)$$

위에서 제시된 평가방법은 관체가 지반과 동일하게 변형한다는 가정에 근거한 것으로서 일반적으로 지반-구조물 상호작용의 측면을 감안한다면 경우에 따라서는 보수적인 결과를 준다. 따라서



본 절에서 제시한 기법은 지반굴착의 영향을 평가하는 단계 중 1차적인 검토단계에서 적용하는데 국한함이 바람직하며 식 (4)와 (5)의 결과와 표 3 및 4를 이용한 평가결과가 '손상가능'으로 나타날 경우에는 지반-구조물 상호작용이 고려된 엄밀한 해석을 수행하여 손상여부를 검토하는 것이 바람직하다고 하겠다.

#### 4.4 적용예

##### 1) 검토조건

본 절에서는 앞절에서 제시한 평가기준을 토대로 가상의 현장에 대한 평가예를 다루었다. 검토현장은 심도 20m의 현장으로 매설관이 묻혀있는 심도에서의 최대 수평변위는 약  $\delta_{max} = 100 \text{ mm}$  간주하였다. 매설관은 직경 800 mm의 lead-yarn 조인트를 갖는 연주철 상수도관으로 지표면으로부터 2m의 심도에 매설되어 있으며, 흙막이벽체로부터 1 m 이격되어 평행하게 위치하는 것으로 가정하였다. 그림 13은 검토조건을 도식적으로 보여주고 있다.

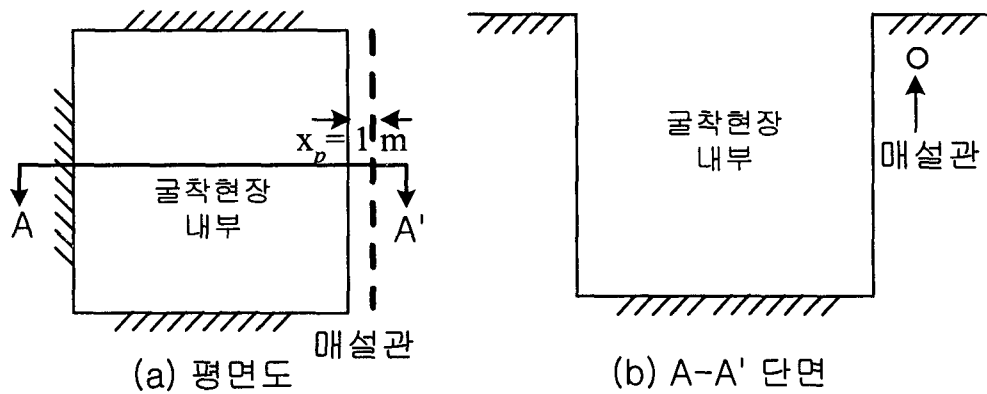


그림 13. 검토 현장 개요도

##### 2) 검토결과

###### (1) 조인트 회전각

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{\delta_{max}}{L} \right)$$

$$L = \sqrt{\frac{\ln(20)}{a}}; L=20\text{m로 가정}; \delta_{max} = 100 \text{ mm}$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{100}{20000} \right) = 0.3 \text{ deg.} \quad \therefore \text{표 3에 의거하여 손상여부 無}$$

###### (2) 관체 변형률

$$\epsilon_{by} = 0.45 a d \delta_{max} = 0.45 \frac{\ln(20)}{(10000)^2} (800) (100)$$

$$\epsilon_{by} = 1078 \mu\epsilon \quad \therefore \text{표 4에 의거하여 손상여부 有}$$

##### 3) 결과 요약

위에서의 계산결과와 같이 주어진 조건에서 매설관은 조인트에서의 회전에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나 관체의 휨 변형률이 대상 매설관의 허용 증분 인장변형률을 초과하는 것으로 나타나 손상이 예상되는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 지반-구조물 상호작용 측

면을 고려하지 않은 것으로서 유한요소해석 등을 이용하여 상세해석을 수행하여 손상여부를 최종적으로 검토하는 것이 바람직하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 지반굴착현장에서 주변 건물 및 매설관의 손상여부를 평가하는 기법을 다루었다. 먼저 지반굴착에 따른 지반거동 메카니즘을 고찰하였으며 건물손상 평가 기법으로서 가장 일반화된 기법을 제시하고 건물손상평가에서의 수평변위 고려의 필요성을 언급하였다. 한편, 매설관의 손상을 평가할 수 있는 기법으로 오차함수를 이용한 조인트에서의 회전 및 관체 변형률을 평가하는 기법을 제시하였으며 매설관 손상평가지 적용할 수 있는 손상유형별 손상한계를 제시하였다. 아울러서 제시된 기법을 이용하여 가상의 굴착현장에 대한 검토를 수행하여 평가기법의 구체적인 적용방법을 제시하였다. 본 고에서 제시된 기법은 건물 혹은 매설관의 손상평가지 1차적인 예비평가에서 적용되는 방법으로서 손상가능성이 있다고 평가된 건물이나 매설관에 대해서는 지반-구조물 상호작용 개념이 적용된 상세검토를 수행하고 그 결과를 토대로 구체적인 손상여부 및 정도에 대한 상세평가를 실시하여 설계 및 시공에 반영하는 것이 바람직하다. 본 논문에서 제시된 기법은 적용이 용이하여 현장에서 손쉽게 적용할 수 있으며 향후 이러한 평가기법을 실무에 도입할 경우 보다 과학적인 도심지 굴착의 설계 및 시공관리가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 유충식, 윤효석, 박영진 (2000). "터널굴착에 의한 인접건물의 손상평가", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제2권, pp. 41-44.
2. Attewell, P. B., Yeates, J, and Selby, A. R.(1986). Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures. Blackie, New York.
3. Boone, S. J., Westland, J., and Nusink, R. (1999). "Comparative evaluation of building response to an adjacent braced excavation", Can. Geotech. J. Vol. 36, pp. 210-223.
4. Boscardin, M. D. and Cording, E. J. (1989). "Building response to excavation-induced settlement". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol. 115, No. GT1, pp. 1-21.
5. Bracegirdle, A., Mair, R. J., Nyren R., J., and Taylor R. N.(1996), "A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced by tunnelling". Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp.659~664.
6. Burland, J. B. (1995). "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations", Invited Special Lecture to IS-ToKyo '95: 1st Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering.

7. Caspe, M. S (1966). "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM4, pp. 51-61.
8. Cording, E. J., Long, J. H., Son, M., and Laefer, D. F. (2000). "Modelling and analysis of excavation-induced building distortion and damage using a strain-based damage criterion", Int. Conf. Response of buildings to excavation-induced ground movements, CIRIA.